

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160680

张超, 宋海清, 吴国周, 李云鹏. NCAR/CLM 系列陆面模式对内蒙古地表温度的模拟评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 299–308

Zhang C, Song H Q, Wu G Z, Li Y P. Simulation and comparative analysis of surface temperature over Inner Mongolia using four NCAR Community Land Models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 299–308

NCAR/CLM 系列陆面模式对内蒙古 地表温度的模拟评估*

张 超, 宋海清, 吴国周, 李云鹏**

(内蒙古自治区生态与农业气象中心 呼和浩特 010051)

摘 要: 地表温度是影响陆-气之间能量和物质交换的重要地球物理变量, 对调节全球气候系统能量循环起着不可或缺的作用。为探讨美国国家大气研究中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)公共陆面模式(Community Land Model, CLM)对地表温度的模拟能力, 利用 1948—2004 年美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)大气强迫场和 NCAR 陆面模式 CLM3.0、CLM3.5、CLM4.0 和 CLM4.5 对内蒙古地区 1981—2004 年的地表温度进行 off-line 模拟, 并与观测地面温度资料进行对比。结果表明: NCAR/CLM 系列陆面模式模拟地表温度都能较好地再现内蒙古地表温度的时空变化特征, 与台站观测有着较好的一致性, 其中 CLM4.5 在内蒙古地区模拟能力最好, 与观测的相关系数最高、平均偏差和均方根误差都最小, 这主要得益于 CLM4.5 对粗糙度计算的改进; 不同版本 CLM 模拟地表温度普遍较观测数值偏低, 在冬季各版本 CLM 模拟结果与观测值之间的平均偏差达到最小, 在夏季的偏差增大, 尤其是在东部地区, 夏季偏差 3 °C 以上, 说明对最高地表温度的模拟能力东部和中部地区明显低于西部地区; 西部地区各个版本差别并不如东部和中部地区明显, 这与 CLM4.0 和 CLM4.5 改进了雪模式和水文过程有关。综上, CLM4.0 和 CLM4.5 在内蒙古地区有较好的适用性, 且模拟值均低于实测地表温度, 冬季偏差较小, 夏季偏差增大, 东部地区偏差大于中部和西部地区。

关键词: NCEP; CLM; 地表温度; 数值模拟; 内蒙古

中图分类号: P423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0299-10

Simulation and comparative analysis of surface temperature over Inner Mongolia using four NCAR Community Land Models*

ZHANG Chao, SONG Haiqing, WU Guozhou, LI Yunpeng**

(Ecological and Agricultural Meteorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010051, China)

Abstract: Surface temperature is an important geophysical parameter in energy and substance exchange processes of land-atmosphere interactions, and is a crucial element of global climate system. Time series of observed surface temperature

* 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506016)、内蒙古气象局科技创新项目(nmqxkjcx201406, nmqxkjcx201602)和内蒙古气象局青年基金项目(nmqnqx201603)资助

** 通讯作者: 李云鹏, 主要从事陆面模式模拟和卫星遥感研究。E-mail: lyp5230@163.com

张超, 主要从事卫星遥感研究。E-mail: 278384173@qq.com

收稿日期: 2016-08-14 接受日期: 2016-11-15

* This research was supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorology in the Public Welfare Profession of China (GYHY201506016), the Science and Technology Innovation Project of Inner Mongolia Meteorological Bureau (nmqxkjcx201406, nmqxkjcx201602) and the Youth Fund Project of Inner Mongolia Meteorological Bureau (nmqnqx201603).

** Corresponding authors, E-mail: lyp5230@163.com

Received Aug. 14, 2016; accepted Nov. 15, 2016

data from meteorological stations are discrete and lack continuity in space. Satellite retrieval of land surface temperature is continuous in space, but with short time series. The simulation of surface temperatures using land surface models is an effective way of obtaining surface temperature data of high temporal resolutions. However, significant differences have been noted between different versions of land surface models, a large part of which lies in the physical processes of key land surface parameters. Thus a comparative evaluation of the performance of surface temperature for 1981–2004 was conducted over Inner Mongolia in this paper using NCAR (National Center for Atmospheric Research) Land Surface Models (CLM3.0, CLM3.5, CLM4.0 and CLM4.5) forced by NCEP (National Center for Environmental Prediction) and ground observation data. The study compared and analyzed differences in the results between models, tested the capability of models to simulate surface temperature over Inner Mongolia and provided guidance and reference for future improvements in the models. The results of the analysis of temporal and spatial variations in surface temperature over Inner Mongolia showed that: NCAR/CLMs simulations could be used to reproduce spatial and temporal variations that were in good agreement with data observed in ground stations. CLM4.5 model was the best as it had the highest correlation coefficient and lowest average deviation and RMS error for the Inner Mongolia due mainly to improvements in the calculation of roughness in the model. The simulation results for surface temperature by different CLM models were generally lower than the observed values. The mean deviation between the CLM simulated results and the ground observations was minimum during winter. Summer bias increased, especially for the eastern region. The deviation in temperature for the eastern part during summer was above 3 °C. This indicated that the simulation capability of maximum surface temperature for the eastern and central regions was significantly lower than that for the western region. The differences between various versions of the model for the western region were not as obvious as those for the eastern and central regions. This was related to the improvements in snow patterns and hydrological processes of CLM4.0 and CLM4.5 model versions. In summary, CLM4.0 and CLM4.5 versions were fully applicable in Inner Mongolia, but the simulated values of surface temperature were lower than the measured ones. While the deviations were small in winter and high in summer, the in the eastern region were greater than those in the central and western regions.

Keywords: NCEP; CLM; Surface temperature; Numerical simulation; Inner Mongolia

地表温度作为表征土壤水热状况的地球物理变量,是影响陆-气之间能量和物质交换的重要因子之一^[1-2],通过影响地表能量和水分收支来影响全球气候变化^[3]。叶笃正等^[4]研究表明青藏高原地面加热对东亚地区的夏季大气环流有重要影响。Wu等^[5-6]提出土壤温度反馈能够显著放大气温变率,对夏季气候年际变率产生重要影响,贡献30%~70%的方差。Yang等^[7-8]认为土壤温度的记忆会随着季节、区域和深度而变化,春季的土壤温度与我国西北干旱/半干旱地区夏季气温有着显著关系。因此,获取精确的地表温度对研究气候变化、土壤水分、冻土融化、农作物播种等均有重要意义^[9]。

气象台站长时间序列的地表温度观测资料是离散的,空间上缺乏连续性;卫星反演地表温度能够获取空间连续的资料,但时间序列较短。近年来,通过陆面模式模拟地表温度成为获取高时空分辨率的地表温度数据的有效途径。本研究所用的陆面模式是美国国家大气研究中心(NCAR)的公用陆面模式(Community Land Model, CLM),该模式是目前国际上最完善的第3代陆面模式之一,是气候系统模式(CCSM)的陆面分量,被广泛应用于陆面过程模拟和气候变化研究。

由于系列陆面模式不同版本之间存在很大差异,这些差异可以在很大程度上代表某些关键陆面物理

过程的差异。通过对比不同版本模式的模拟结果,可以了解这些关键陆面过程差异所造成的影响,加深对关键陆面物理过程的理解。陈海山等^[10-11]利用CLM3.0对中国区域浅层和深层土壤温度进行模拟与对比,朱司光等^[12-13]利用CLM3.0、CLM3.5和CLM4.0 3个版本的CLM对全球近50 a陆面状况进行模拟与对比,但CLM4.5模式模拟能力尚未得到检验。此外,针对全球、全国区域开展的评估检验站点数量较少,内蒙古地区东西跨度大,农牧林交错地表类型较为复杂,有必要增加地表观测点数量,提高对比评估的代表性。

本文基于CLM3.0、CLM3.5、CLM4.0和CLM4.5 4个不同版本的陆面模式对内蒙古陆面过程中地表温度进行模拟,利用内蒙古113个台站逐月0 cm地表温度观测资料(1981—2004年)评估不同版本NCAR/CLM模拟结果,在较长时间尺度上检验NCAR/CLM系列陆面模式在跨越半湿润-半干旱-干旱区的内蒙古高原的模拟性能和精度,旨在系统地对比和分析系列模式之间的结果差异,检验模式在内蒙古区域的模拟能力,以期能为将来的模式改进提供一些帮助和参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源及处理

本文所用的资料包括NCEP大气强迫场资料 and

内蒙古台站观测资料。Qian等^[14-15]基于NCAR/NCEP的1948—2004年全球近地面气温、气压、风速、比湿、辐射和降水资料发展了时空分辨率为3 h、T62的气象强迫场数据。研究表明,使用NCEP大气强迫场驱动CLM3,对陆表水文变量有着较好的模拟。地表温度评估所用气象站观测资料来自内蒙古生态与农业气象中心提供的内蒙古气象站观测资料,该资料包含了全自治区1981—2004年113个常规人工台站观测的月平均地表温度,已剔除站点包括:资料年代不足的3个站点(霍林郭勒2006年建站,呼市南郊1991建站,李井滩1991年建站)、迁站的1个站点(头道湖)和地处国界线边缘,受空间分辨率影响无法使用的2个站点(二连浩特、满洲里)。

使用NCEP大气强迫场(1948—2004年)驱动NCAR/CLM运行112年作为初始场,开始运行CLM,积分步长为1 800 s,1981—2004年的结果用于分析。各版本NCAR/CLM模拟输出月平均地表温度数据空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,覆盖整个内蒙古地区。在分析各版本输出资料与观测之间的差异时,采用距离观测位置最近的格点与该站点资料一一匹配的方法^[16]。为了定量地分析各版本输出地表温度资料在内蒙古地区的差异,采用平均偏差、均方根误差和相关系数3个特征统计量进行对比。

1.2 CLM 不同版本差异分析

2004年CLM3.0正式发布,在垂直上有1层植被冠层、10层土壤层和最多5层的积雪(根据积雪厚度而定),可以对生物地球物理过程、生物地球化学过程、水文过程和全球动力植被过程(可选)进行模拟。下垫面每个格点内分成冰川、湿地、湖泊、植被和城市5类次网格覆盖类型,每个网格的植被又分成多种不同的植物功能型。土壤质地考虑了砂土和黏土的垂直变化^[17-18]。

2008年CLM3.5发布,在CLM3.0的基础上采用基于MODIS观测资料的地表数据^[19],改进了冠层截留方案^[20],选用基于TOP-MODEL模块模拟径流,增加了简单的地下水模块^[21],同时引进全新的冻土参数化过程方案^[22]。相对于CLM3.0,该版本更新的下垫面资料分辨率更加精细,对土壤水热模拟有明显改进^[23]。

2010年CLM4.0发布,与CLM3.5相比,主要修正了Richards方程数值求解方案,用土壤蒸发阻力函数取代了阻力系数,改进了土壤边界条件,使得地下水与土壤水直接耦合^[24-25],同时考虑了冠层凋落物及冠层内部稳定性的影响,土壤有机质对水分运动的影响等^[26],积雪模式有了较大改进^[27],以上

改进大大改善了模式对水热的模拟^[28]。

2013年NCAR发布了新版公用地球系统模式CESM1.2.0,其中陆面分量为CLM4.5,改善了植被辐射过程及相关参数^[29-30],改进了多年冻土区水文过程^[31],增加了可选水文过程VIC^[32],新积雪部分参数化过程以提高对季节性雪深、雪盖百分比的模拟^[33]。

由于利用陆面模式NCAR/CLM在中国区域的评估工作较少,而且不同版本的NCAR/CLM差异对模拟地表温度有怎样的影响尚不清楚,因此,有必要将该版本在研究区域进行数值模拟与分析评估。

1.3 研究区概况

内蒙古是我国北方重要的生态屏障,占全国土地面积的12.3%,地域辽阔,气象站观测较为稀疏。大兴安岭-阴山-贺兰山为东亚季风边缘区,从东向西降水量逐渐减少,年平均气温逐步增加,从半湿润、半干旱到干旱分布。为了对气候差异较大的内蒙古地区的地表温度进行合理评估,按照《关于使用统一气象预报地域用语标准的通知》(内气科函[2008]34号)文件,将内蒙古划分为东部、中部和西部3个区域,东部包括呼伦贝尔、兴安盟、通辽、赤峰,中部包括锡林郭勒、乌兰察布、呼和浩特,西部包括包头、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌海、阿拉善,各盟市地理位置如图1所示^[34]。

2 结果与分析

2.1 地表温度的气候态空间分布特征与统计分析

冷偏差是指模拟地表温度比观测低,反之为暖偏差。分别绘制1981—2004年站点观测平均地表温度空间分布和CLM不同版本模拟平均地表温度的空间分布(图2)。

从1981—2004年平均地表温度空间分布图可以看出,CLM3.0、CLM3.5、CLM4.0和CLM4.5模拟地表温度空间分布与台站观测有着较好的一致性,都能较好地再现内蒙古地区地表温度从东北向西部逐渐增高的空间分布特征(图2)。主要呈现径向分布,东西部温差较大。呼伦贝尔北部是多年平均地表温度的低值区,最低值可达 -2°C 以下;阿拉善盟是多年平均地表温度的高值区,中心平均最高温度可达 12°C 以上;在赤峰、通辽等部分西辽河流域地区地表温度也较高,仅次于阿拉善高原地区;中部地区地表温度 4°C 左右。各版本陆面模式模拟地表温度与观测资料比较接近,特别是在西部地区。

各模式模拟结果与台站观测数据相比,全自治区均呈现出冷偏差,这种冷偏差在东部地区大于西

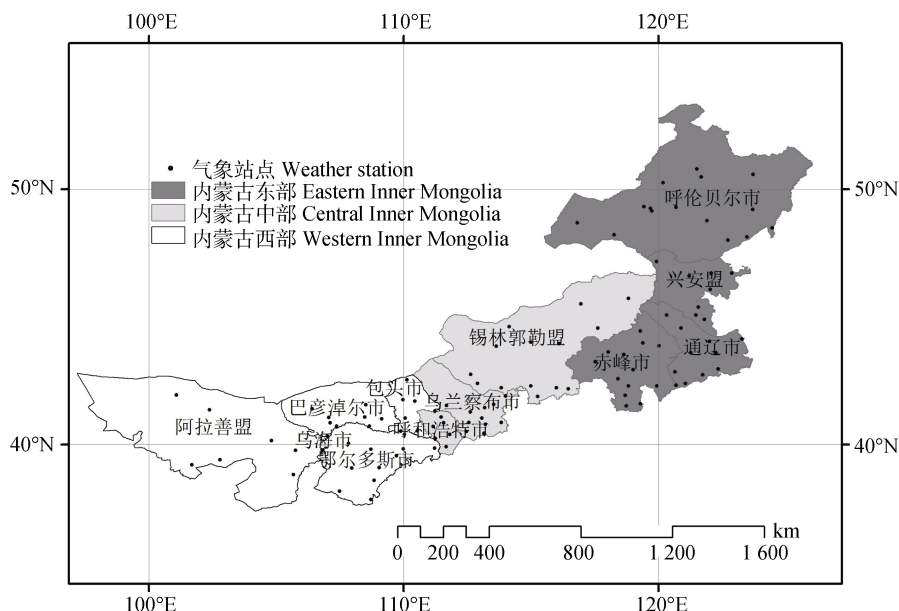


图1 内蒙古区域划分及气象站点分布

Fig. 1 Regional division and distribution of weather stations in Inner Mongolia

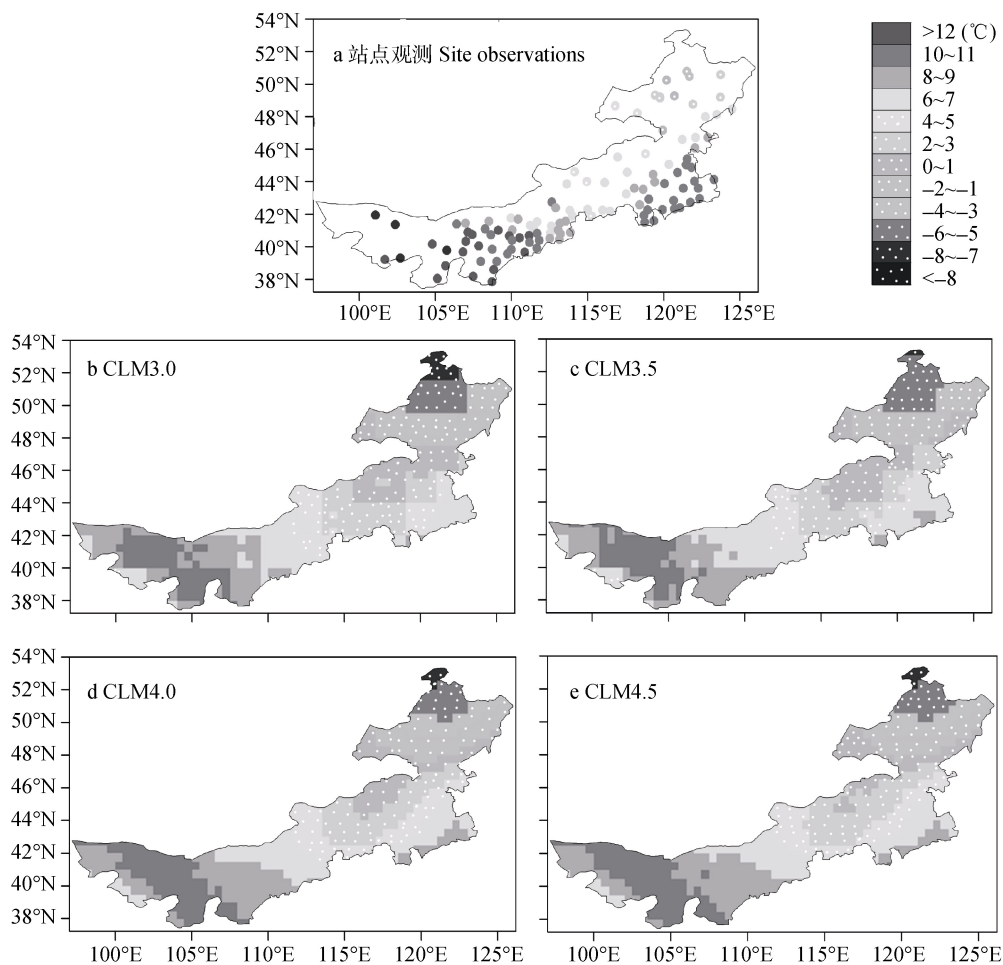


图2 1981—2004年观测(a)和不同版本CLM模拟(b-e)的内蒙古平均地表温度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average surface temperature in Inner Mongolia based on observation (a) and different versions of the CLM simulation (b-e)

部地区。陈海山等^[10]研究表明, CLM3.0 在河套及以
东地区出现暖偏差, 其余大部分地区出现冷偏差,

与本文结果相一致, 内蒙古河套及以东地区冷偏差
较小, 呈现冷偏差自东向西减少的特点。在呼伦贝

尔北部, 各版本陆面模式 CLM 均模拟出地表温度低于 -4°C 的低值区, 而该地区为大兴安岭腹地, 无观测资料, 因而无法判定该地区模拟结果的可靠性。在西辽河流域地区, 各版本模式模拟结果都有低估的趋势, 其中 CLM4.0 和 CLM4.5 相对模拟较好。而在鄂尔多斯高原, 各个版本陆面模式模拟结果都显著低估了该地区的地表温度, CLM4.0 和 CLM4.5 对鄂尔多斯高原南部地区模拟有所改善。在阿拉善右旗南部, 各个版本模式模拟结果都有所低估, 尤其是 CLM3.5, 低估 6°C 以上, 而在 CLM4.0 和 CLM4.5 中

有所改善, 但仍然低估 2°C 左右。而对于西部沙漠地区, 模拟结果与观测结果吻合较好。朱司光^[13]研究表明, CLM4.0 较之前两个版本系统偏差相对较小, 且各模式在浅层的结果极为接近, 与本文结果相一致, 各个版本模拟出的地表温度的空间分布型较为类似, 模拟结果接近, CLM4.0 和 CLM4.5 模拟能力更好。

从表 1 统计特征可以看出, 在东部、中部和西部 3 个地区, 各版本 CLM 模拟结果对研究区域大部地区地表温度变化趋势有着很好的模拟能力, 不同版本 CLM 之间的差异并不显著。

表 1 内蒙古东、中、西部地区不同版本 CLM 模拟和台站观测的地表温度相关系数、平均偏差和均方根误差
Table 1 Surface temperature correlation coefficient, mean deviation and root mean square error of CLM simulation and station observation in different regions of Inner Mongolia

地区 Region	项目 Item	CLM3.0	CLM3.5	CLM4.0	CLM4.5
东部 Eastern	相关系数 Correlation coefficient	0.995 6**	0.997 4**	0.998 1**	0.997 9**
	平均偏差 Average deviation	-3.15	-2.38	-1.98	-1.87
	均方根误差 Root mean square	4.13	3.14	2.57	2.61
中部 Central	相关系数 Correlation coefficient	0.996 3**	0.996 7**	0.996 9**	0.997 4**
	平均偏差 Average deviation	-0.99	-1.05	-0.35	-0.07
	均方根误差 Root mean square	2.20	2.11	1.73	1.70
西部 Western	相关系数 Correlation coefficient	0.997 7**	0.997 2**	0.997 6**	0.997 8**
	平均偏差 Average deviation	-1.29	-1.53	-0.96	-0.86
	均方根误差 Root mean square	2.35	2.53	2.14	2.14

**表示通过了 99.9% 的信度检验。 ** indicates a 99.9% confidence test.

3 套资料在各地区相关系数均比较高, 高于 0.995, 且均通过了 99.9% 的信度检验。4 个版本模式模拟在相关系数上差别很小, 东部地区最低相关系数为 0.995 6, 与最高相关系数 0.998 1 差别极小, 中部地区和西部地区差别更小, 说明各版本 CLM 对东部地区地表温度的趋势模拟能力稍差于中西部地区。

从平均偏差来看, 各版本平均偏差区别较大。在东部地区, CLM4.5 平均偏差最小为 -1.87°C , 最大偏差为 CLM3.0, 为 -3.15°C , 由此可见, CLM4.5 对东部地区的模拟偏差更为理想; 在中部地区, CLM4.5 的偏差最小, 为 -0.07°C , 显著低于 CLM3.5 的 -1.05°C ; 在西部地区, CLM4.5 有着最低的偏差, 显著低于 CLM3.5 的偏差。由此可见 CLM4.5 的偏差最小, 对中西部地区的模拟偏差小于东部。

从均方根误差来看, 东部地区 CLM4.0 均方根误差最小, 为 2.57, 与 CLM4.5 不相上下, 均显著小于 CLM3.0 的均方根误差; 在中部地区各个版本均方根误差差别不明显, 以 CLM4.5 和 CLM4.0 的最小, 为 1.70 和 1.73; 在西部地区, 各个版本均方根误差同样差别不显著, CLM4.0 和 CLM4.5 表现最好, 均好于 CLM3.0 和 CLM3.5。

综合 3 个统计特征来看, 在中部和西部地区 CLM4.5 显著好于 CLM3.0 和 CLM3.5, 与 CLM4.0 差别较小, 不管是相关系数还是平均偏差和均方根误差均最好。在东部地区 CLM4.0 表现最好, 有着最高的相关系数和最低的均方根误差, 但偏差稍逊于 CLM4.5。CLM4.0 和 CLM4.5 在 3 个分区表现较为一致, 均表现为对中部和西部的模拟能力高于东部, 东部偏差和均方根误差略大, 均显示出冷偏差, 中部和西部偏差和均方根误差略小。

2.2 CLM 模式模拟地表温度的季节循环与观测资料的对比

通过对 1981—2004 年内蒙古东部、中部和西部 3 个分区域月平均地表温度的季节变化(图 3)能够看出: 各个版本 CLM 模拟结果都能较好地再现地表温度的季节循环变化, 量值也较为接近, 尤其是在 11 月—翌年 1 月; 3 个分区的地表温度在 1 月达到最低, 东部和中部地区低于 -18°C , 西部地区低于 -10°C , 7 月达到最高, 东部和中部地区高于 26°C , 西部地区高于 29°C 。

各个版本 CLM 模拟结果在东部、中部和西部地区的变化趋势比较一致。从不同版本 CLM 模拟的月

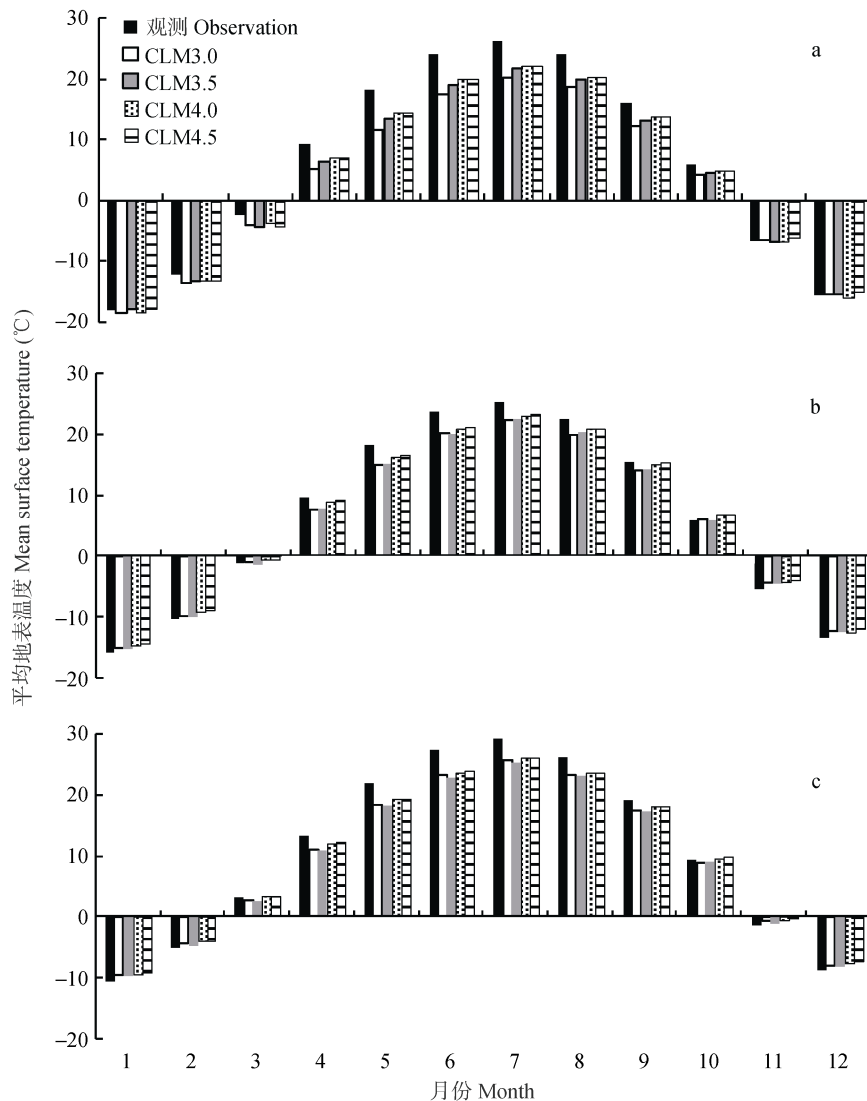


图3 内蒙古东部(a)、中部(b)和西部(c)1981—2004年观测与CLM模拟月平均地表温度图

Fig. 3 Observed and CLM simulated monthly mean surface temperature from 1981 to 2004 in eastern (a), middle (b) and western (c) regions of Inner Mongolia

平均地表温度与观测值平均偏差(图4)可以看出,不同版本CLM模拟地表温度普遍较观测数值偏低。冬季,各版本CLM模拟结果与观测值之间的平均偏差达到最小,夏季的偏差增大,尤其是在东部地区,夏季差异3~8℃,大于其他地区,说明东部和中部地区对最高地表温度的模拟能力明显低于对西部地区的模拟能力。CLM4.0和CLM4.5模拟结果明显好于CLM3.0和CLM3.5模拟结果,量值更接近观测值。但在西部地区各个版本差别并不如东部和中部地区明显,这与CLM4.0和CLM4.5改进了雪模式和水文过程有关。各版本CLM模拟结果时间变化趋势一致性较高,均对地面温度最低月份描述较好,但对最高地表温度模拟能力有待进一步改进。另外从图中还可以看出,CLM3.5对季节循环的模拟能力稍弱。

对历年各月不同版本CLM模拟结果与观测值的平均偏差进行分级个数统计(表2),可以看出,东部地区CLM3.0模拟结果比观测值偏低5℃以上的月份达82个,偏差较大,其余各版本的模拟结果60%左右的月份比观测值偏低1~5℃;中部地区CLM3.0、CLM3.5模拟结果50%以上的月份比观测值偏低1~5℃,CLM4.0和CLM4.5模拟结果略好;西部地区各版本50%左右模拟结果较观测值偏低1~5℃,32%左右模拟结果接近观测值,相差-1~1℃。

2.3 地表温度月平均时间序列与观测值的对比

图5是CLM3.0、CLM3.5、CLM4.0和CLM4.5模拟的地表温度月平均时间序列与观测值的比较。能够看出,不同版本的CLM模拟结果均能较好地再现内蒙古东部、中部和西部地区地表温度的时间变化趋势特征,24年逐月量值吻合均较好。

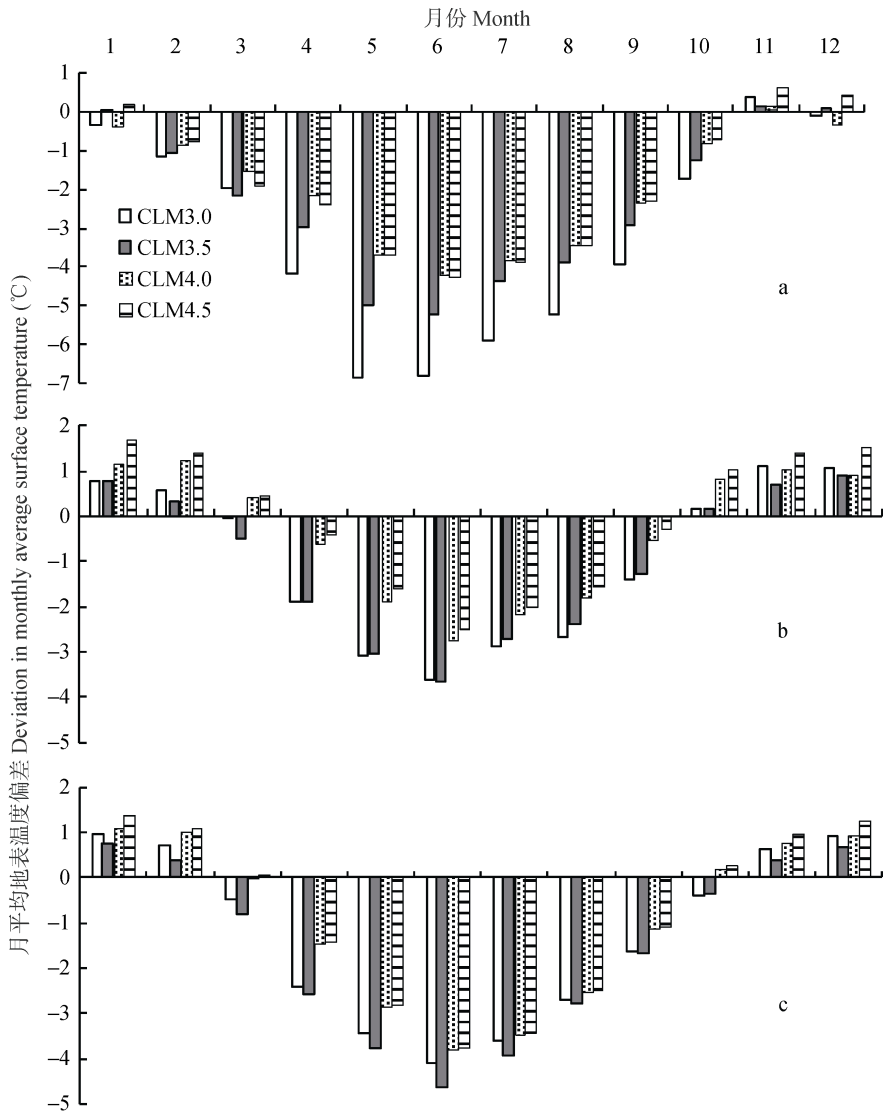


图 4 1981—2004 年内蒙古东部(a)、中部(b)和西部(c)不同版本 CLM 模拟结果与观测值各月平均地表温度偏差分布图
Fig. 4 Deviations in monthly average surface temperature between CLM simulated and observed values from 1981 to 2004 in eastern (a), middle (b) and western (c) regions of Inner Mongolia

表 2 1981—2004 年内蒙古东部、中部和西部不同版本 CLM 模拟和台站观测月平均地表温度差值的分级个数统计
Table 2 Classification numbers of difference in monthly average surface temperature between CLM simulated and observed values from 1981 to 2004 in eastern, middle and western regions of Inner Mongolia

地区 Region	偏差 Deviation	CLM3.0	CLM3.5	CLM4.0	CLM4.5
东部 Eastern	<-5	82	35	8	8
	-5~-1	129	165	189	176
	-1~1	69	82	87	87
	>1	8	6	4	17
中部 Central	<-5	0	1	0	0
	-5~-1	150	147	103	94
	-1~1	84	95	111	107
	>1	54	45	74	87
西部 Western	<-5	1	9	0	0
	-5~-1	153	151	140	136
	-1~1	89	99	97	91
	>1	45	29	51	61

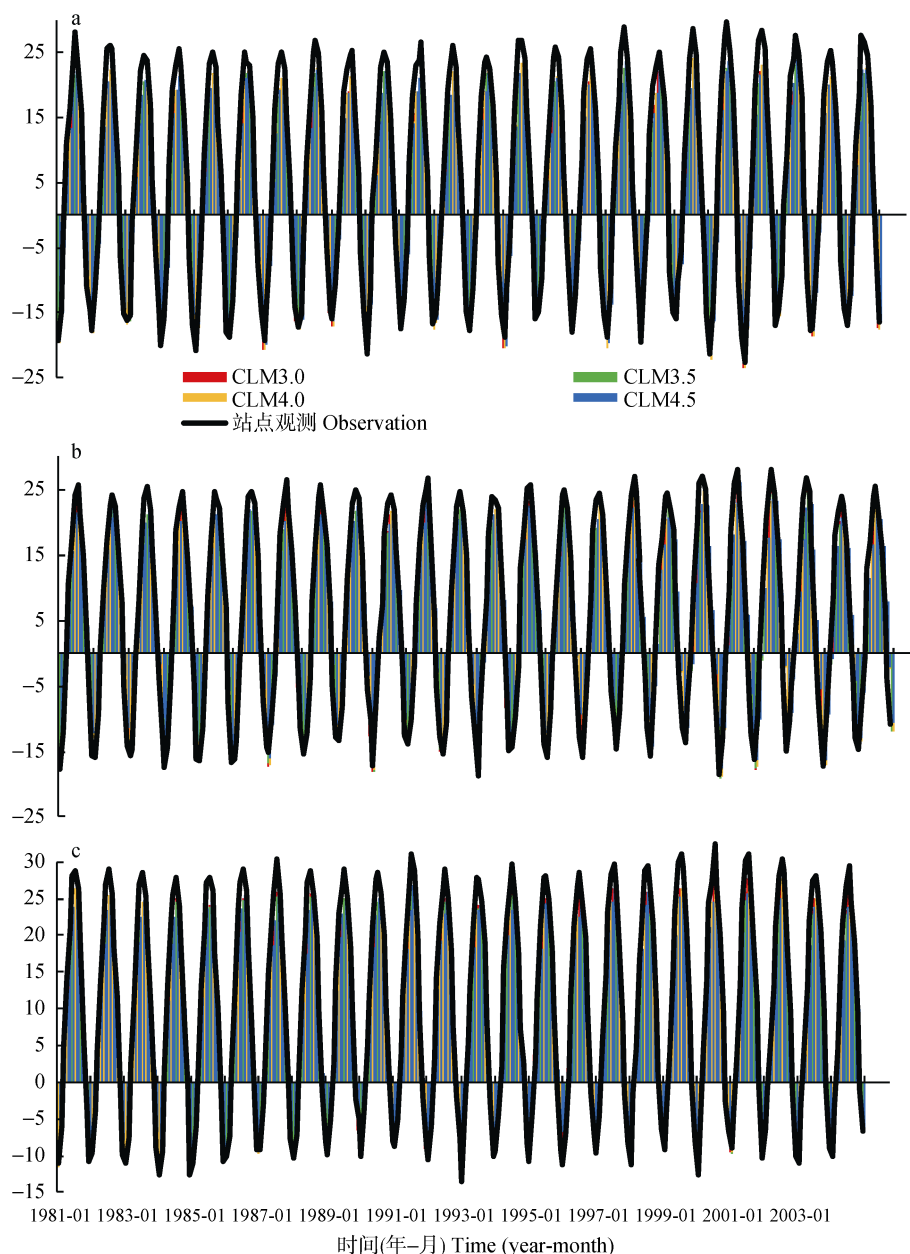


图5 1981—2004年内蒙古东部(a)、中部(b)和西部(c)观测地表温度和模拟月平均地表温度时间序列

Fig. 5 Time series of observed and simulated monthly mean surface temperature in eastern (a), central (b) and western (c) regions of Inner Mongolia from 1981 to 2004

总体来看,各个版本CLM均能够较好地再现内蒙古东部、中部和西部地区地表温度的季节循环变化特征,在冬季的模拟要好于夏季,主要表现在各个版本CLM模拟结果在冬季的偏差明显小于夏季。需要指出的是各个版本CLM模拟结果均比观测值低,均低估了地表温度,而且在东部地区低估程度要大于中部和西部地区。

3 结论与讨论

本文利用1981—2004年4个版本的CLM模式模拟地表温度在内蒙古的时空变化,并分别与气象站观测资料进行对比分析,探讨了不同版本NCAR/

CLM模拟地表温度资料在内蒙古东部、中部和西部的模拟能力和差异,并讨论了其在内蒙古各地区的适用性和精度。结论如下:

(1)NCAR不同版本的陆面模式模拟地表温度都能较好地再现内蒙古各个区域地表温度的时空变化特征,其中CLM4.5模拟最好,有着最小的平均偏差和均方根误差,以及更高的相关系数,CLM4.0和CLM4.5模拟结果相近,在内蒙古地区有较好的适用性。主要原因是CLM4.0和CLM4.5改善了陆面水文过程和雪模式以及辐射过程。CLM3.5使用2001年MODIS下垫面资料,但模拟分析时段为1981—2004

年,受下垫面类型的年际变化及精度影响,CLM3.5表现较差;而CLM4.0和CLM4.5采用了更高精度的下垫面资料,有效提高模拟效果。

(2)各版本CLM模拟值均低于实测地表温度,均出现冷偏差,冬季偏差较小,夏季偏差增大,东部地区偏差大于中部和西部地区。主要原因有两方面:1)与CLM的生物地球物理过程描述有待进一步完善以及陆面模式下垫面不合理等有关;2)气象站观测资料主要是在裸土地段进行观测,相对于自然状态下观测温度有差异,观测的最高温度高于自然状态,而模式模拟资料为自然状态下的地表温度,所以冷偏差显著。而CLM4.5对该部分参数化有了改进,使得CLM4.5与观测值更为接近。

由于内蒙古地区地域广大,而气象站观测站点数量有限,文中还存在一些需要改进的地方。首先,在验证过程中不同数据尺度的匹配上,站点观测只能代表该观测点的状况,对于周围的代表性有限,而模式资料的空间分辨率为 0.5° ,代表的是该格点的平均状态,观测密集的地区使用该格点覆盖范围的所有观测点的平均来代表该点的状态,而观测稀疏的地区最多只有1个站点代表,所以偏差在所难免。其次,模式下垫面代表性的问题也有待改进,每年下垫面都有所不同,而模式运行1948—2004年均使用同一年的下垫面资料,对于影响地表温度的植被覆盖等因子的变化考虑不足,也是下一步研究的重点。

参考文献 References

- [1] 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 227–234
Zhang H Z, Shi X Z, Yu D S, et al. Study on seasonal variations of soil temperature and its regional differentiation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 227–234
- [2] 陈海山,孙照渤. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 277–288
Chen H S, Sun Z B. Review of land-atmosphere interaction and land surface model studies[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2002, 25(2): 277–288
- [3] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 290–296
Li C Y. Introduction to Climate Dynamics[M]. Beijing: Meteorological Press, 1995: 290–296
- [4] 叶笃正,张捷迁. 青藏高原加热作用对夏季东亚大气环流影响的初步模拟[J]. 中国科学, 1974(3): 301–320
Ye D Z, Zhang J Q. Preliminary simulation of the influence of heating on the east Asian atmospheric circulation in the Tibetan Plateau[J]. Science China, 1974(3): 301–320
- [5] Wu L Y, Zhang J Y. Strong subsurface soil temperature

feedbacks on summer climate variability over the arid/semi-arid regions of East Asia[J]. Atmospheric Science Letters, 2014, 15(4): 307–313, doi: 10.1002/asl2.504

- [6] 张井勇,吴凌云. 陆-气耦合增加中国的高温热浪[J]. 科学通报, 2011, 56(23): 1905–1909
Zhang J Y, Wu L Y. Land-atmosphere coupling amplifies hot extremes over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(23): 1905–1909
- [7] Yang K, Zhang J Y. Spatiotemporal characteristics of soil temperature memory in China from observation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 126(3/4): 739–749
- [8] 杨凯,冯永忠,李永平,等. 黄土高原坡耕地不同耕作措施对土壤温度和水分的作用效应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 190–195
Yang K, Feng Y Z, Li Y P, et al. Effect of different cultivation measure on soil temperature and moisture in the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 190–195
- [9] 王爱文. 考虑冻融界面变化的陆面过程模式[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2013: 52
Wang A W. Land surface process model considering freezing-thaw interfacial change[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences 2013: 52
- [10] 陈海山,熊明明,沙文钰. CLM 3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 : 土壤温度[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 621–630
Chen H S, Xiong M M, Sha W Y. Simulation of land surface processes over China and its validation Part : Soil temperature[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(5): 621–630
- [11] 熊明明,陈海山,俞森. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 : 土壤湿度[J]. 气象科学, 2011, 31(1): 1–10
Xiong M M, Chen H S, Yu M. Simulation of land surface processes over China and its validation. Part : Soil moisture[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2011, 31(1): 1–10
- [12] 朱司光,陈海山,周晶. NCAR_CLM 系列模式对全球近 50a 陆面状况的模拟及其分析比较[J]. 大气科学学报, 2013, 36(4): 434–446
Zhu S G, Chen H S, Zhou J. Simulations of global land surface conditions in recent 50 years with three versions of NCAR Community Land Models and their comparative analysis[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(4): 434–446
- [13] 朱司光. NCAR_CLM 系列陆面模式对全球和区域陆面过程模拟的对比研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 25–35
Zhu S G. Comparison study on simulation results of global and regional land surface processes from three versions of community land model[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012: 25–35
- [14] Qian T, Dai A, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing data and e-valuations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(5):

- 953–975
- [15] 宋海清. 基于 PODEn4DVar 数据同化方法的全球陆面数据同化系统发展[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2013: 42
Song H Q. Development of global land data assimilation system based on PODEn4DVar data assimilation method[D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2013: 42
- [16] 顾润源. 内蒙古自治区天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 1–2
Gu R Y. Inner Mongolia Autonomous Region Weather Forecast Manual[M]. Beijing: Meteorological Press, 2012: 1–2
- [17] Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the community land model (CLM 3.0)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(G1), doi: 10.1029/2006JG000168
- [18] 杜川利, 刘晓东. 公用陆面模式(Community Land Model 3.0)简介[J]. *陕西气象*, 2005(6): 13–14
Duan C L, Liu X D. Brief introduction of Community Land Model 3.0[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2005(6): 13–14
- [19] Lawrence D M, Thornton P E, Oleson K W, et al. The partitioning of evapotranspiration into transpiration, soil evaporation, and canopy evaporation in a GCM: Impacts on land-atmosphere interaction[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(4): 862–880
- [20] Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D21), doi: 10.1029/2005JD006111
- [21] Niu G Y, Yang Z L. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 937–952
- [22] Zeng X B, Decker M. Improving the numerical solution of soil moisture-based Richards equation for land models with a deep or shallow water table[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(1): 308–319
- [23] Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(G1), doi: 10.1029/2006JG000168
- [24] Decker M, Zeng X B. Impact of modified Richards equation on global soil moisture simulation in the Community Land Model (CLM 3.5)[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2009, 1(3), doi: 10.3894/JAMES.2009.1.5
- [25] Sakaguchi K, Zeng X B. Effects of soil wetness, plant litter, and under-canopy atmospheric stability on ground evaporation in the Community Land Model (CLM3.5)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D1), doi: 10.1029/2008JD010834
- [26] Flanner M G, Zender C S. Linking snowpack microphysics and albedo evolution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D12), doi: 10.1029/2005JD006834
- [27] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical description of version 4.0 of the community land model (CLM)[R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, 2010: 257
- [28] 赖欣, 文军, 岑思弦, 等. CLM4.0 模式对中国区域土壤湿度的数值模拟及评估研究[J]. *大气科学*, 2014, 38(3): 499–512
Lai X, Wen J, Cen S X, et al. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture over China by using CLM4.0 model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(3): 499–512
- [29] Swenson S C, Lawrence D M, Lee H. Improved simulation of the terrestrial hydrological cycle in permafrost regions by the community land model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(3): M08002, doi: 10.1029/2012MS000165
- [30] 宋耀明, 范轶, 马天娇. 陆面过程模式 CLM4.5 在半干旱区退化草原站的模拟性能评估[J]. *大气科学学报*, 2014, 37(6): 794–803
Song Y M, Fan Y, Ma T J. Evaluation of simulation performance of land surface model NCAR_CLM4.5 at a degraded grassland station in semi-arid area[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(6): 794–803
- [31] Li H Y, Huang M Y, Wigmosta M S, et al. Evaluating runoff simulations from the Community Land Model 4.0 using observations from flux towers and a mountainous watershed[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D24): D24120, doi: 10.1029/2011JD016276
- [32] Swenson S C, Lawrence D M. A new fractional snow-covered area parameterization for the community land model and its effect on the surface energy balance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D21): D21107, doi: 10.1029/2012JD018178
- [33] Subin Z M, Riley W J, Mironov D. An improved lake model for climate simulations: Model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(1): M02001, doi: 10.1029/2011MS000072
- [34] 张超. 内蒙古植被覆盖变化及其与区域气候相互关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 4
Zhang C. The change of vegetation coverage and the relationship with regional climates in Inner Mongolia[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013: 4